

Tiphaine Chevallier, Tantely M. Razafimbelo, Lydie Chapuis-Lardy et Michel Brossard (dir.)

Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles

IRD Éditions

Chapitre 11. Christian Pieri, *Fertilité des terres de savanes : 25 ans après*

Hervé Guibert

DOI : 10.4000/books.irdeditions.35107
Éditeur : IRD Éditions, FAO
Lieu d'édition : Rome, Marseille
Année d'édition : 2020
Date de mise en ligne : 16 décembre 2020
Collection : Synthèses
ISBN électronique : 9782709928373



<http://books.openedition.org>

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2020

Référence électronique

GUIBERT, Hervé. *Chapitre 11. Christian Pieri, Fertilité des terres de savanes : 25 ans après* In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles* [en ligne]. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020 (généré le 18 décembre 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/35107>>. ISBN : 9782709928373. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.35107>.

Christian Pieri, *Fertilité des terres de savanes : 25 ans après*

Hervé GUIBERT

Introduction

Le livre de Christian PIERI (1989), *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*, a marqué une étape importante dans les exposés de l'état et des causes de la dégradation des terres en Afrique subsaharienne et des solutions à y apporter. Son succès repose sur la qualité des synthèses réalisées sur ce thème, établissant ainsi un état des lieux et des connaissances en 1989.

Il nous est apparu intéressant de voir (1) quelles nouvelles connaissances fondamentales ont été apportées sur les processus d'évolution de la fertilité des sols dans cette région durant les 25 années qui ont suivi la parution de cet ouvrage (période 1989-2014), (2) si le diagnostic posé par Christian Pieri était toujours d'actualité et (3) si des avancées significatives en matière de lutte contre la dégradation des sols ont été réalisées depuis.

Évolution des rendements nationaux

Bilan établi par PIERI (1989)

Avant d'aborder les aspects techniques de la dégradation des sols, Pieri analyse en 1989 l'évolution des rendements nationaux sur les 30 à 40 années précédentes

et distingue trois situations : (1) des rendements en baisse : mil et sorgho au Niger, arachide au Sénégal ; (2) des rendements en stagnation : mil et arachide au Mali et au Burkina Faso et (3) des rendements en augmentation : maïs et coton au Mali, coton au Burkina Faso.

Situation 25 ans après

La confrontation des rendements nationaux sur les périodes 1960-1980 et 2000-2014, pour chacune des trois situations, figure aux tableaux 1 à 3.

Le constat est le suivant : bien que la majorité des rendements nationaux montre une augmentation dans les années qui ont suivi l'analyse de PIERI (1989), celle-ci est faible. Pour les rendements en déclin en 1980, l'évolution sur les décennies qui suivent est parfois une poursuite de la baisse des rendements (tabl. 1). Pour les rendements en stagnation en 1980, l'évolution est une augmentation : entre 37 et 58 % en 25 ans (tabl. 2). Pour les rendements en augmentation en 1980, la progression se poursuit mais ne permet d'atteindre que la tonne (ou Mg) par hectare, sauf pour le maïs au Mali avec 1,8 Mg.ha⁻¹ (tabl. 3). Les rendements nationaux sont donc, sauf exception, restés à des niveaux faibles. Selon l'Economic research service utilisant les données de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et cité par OGUNKUNLE et MUSUMBA (2014), les rendements moyens en céréales entre 1990 et 2010 des pays à faible revenu et à déficit vivrier (PFRDV) d'Afrique subsaharienne ont stagné autour d'une tonne de grains par hectare, très en dessous des valeurs atteintes dans les PFRDV des régions d'Afrique du Nord, d'Amérique latine et d'Asie qui ont vu ces rendements progresser jusqu'à atteindre 2,0 à 2,5 Mg.ha⁻¹ pendant la même période.

Il est difficile à partir de ces seules données de connaître les causes de ces quasi-stagnations, l'évolution des rendements étant la résultante de facteurs multiples (*i.e.* climat, fertilité des sols, pratiques culturales, pression des ravageurs). En ce qui concerne le climat, les années 1960-1980 sont marquées par deux périodes climatiques distinctes au Sahel, une période humide avant 1970 et une période de sécheresse ensuite. Ceci rend difficile la comparaison des rendements entre ces deux périodes. Selon LEBEL et ALI (2009), le déficit pluviométrique en Afrique de l'Ouest est resté inchangé entre 1990-2007 et 1970-1989, supérieur à la moyenne de 1950-1969, même si les années 2000-2006 correspondent à une période plus humide.

PIERI (1989) indique que l'accroissement des productions s'effectue principalement à travers l'extension des surfaces cultivées et, dans quelques rares cas, par l'intensification des cultures. Du fait de l'accroissement concomitant de la population, les productions des cultures vivrières par habitant en Afrique subsaharienne, entre les périodes 1968-1972 et 2008-2012, n'ont progressé que de 10 % en passant de 254 à 280 kg par habitant. Dans la même période, la production de viande par habitant n'a pas évolué (14 kg.an⁻¹ : OGUNKUNLE et MUSUMBA, 2014). Les quasi-stagnations des rendements des cultures au Sahel

ne sont pas en relation avec des conditions climatiques défavorables. Il n'est pas non plus possible à partir de ces données de conclure à une baisse générale de la fertilité des sols. Il est probable que cette situation soit à mettre en parallèle avec des pratiques culturales qui évoluent peu.

Tableau 1
Évolution des rendements nationaux pour les cultures
dont les rendements étaient en baisse en 1980.

| Pays | Cultures | Rendements moyens* 1960-1980 (kg.ha ⁻¹) | Rendements moyens** 2000-2014 (kg.ha ⁻¹) | Évolution (%) |
|---------|-------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------|
| Niger | Mil | 328 | 448 | + 37 |
| | Sorgho | 487 | 327 | – 33 |
| Sénégal | Arachide (coques) | 845 | 810 | – 4 |

* Source : PIERI (1989).

** Source : base de données FAOSTAT : <http://faostat.fao.org/>

Tableau 2
Évolution des rendements nationaux pour les cultures
dont les rendements étaient en stagnation en 1980.

| Pays | Cultures | Rendements moyens* période I** (kg.ha ⁻¹) | Rendements moyens*** 2000-2014 (kg.ha ⁻¹) | Évolution (%) |
|--------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------|
| Mali | Mil | 589 | 809 | + 37 |
| | Arachide (coques) | 677 | 1 021 | + 51 |
| Burkina Faso | Mil | 507 | 803 | + 58 |
| | Arachide (coques) | 517 | 791 | + 53 |

* Source : PIERI (1989).

** Au Mali pour le mil : 1950-1982 ; au Burkina Faso pour le mil : 1960-1980 ; au Mali et Burkina Faso pour l'arachide : 1960-1982.

*** Source : base de données FAOSTAT : <http://faostat.fao.org/>

Tableau 3
Évolution des rendements nationaux pour les cultures
dont les rendements étaient en augmentation en 1980.

| Pays | Cultures | Rendements moyens* 1960-1970 (kg.ha ⁻¹) | Rendements moyens* 1971-1980 (kg.ha ⁻¹) | Rendements moyens 2000-2014 (kg.ha ⁻¹) | Évolution entre périodes 1971-1980 et 2000-2014 (%) |
|--------------|----------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Mali | Maïs | 692 | 975 | 1 818** | + 86 |
| | Coton | 394 | 969 | 1 060*** | + 9 |
| Burkina Faso | Coton | 222 | 608 | 1 095*** | + 80 |

* Source : Pieri (1989).

** Source : base de données FAOSTAT : <http://faostat.fao.org/>

*** Source : Bulletin du Comité consultatif international du coton – Statistiques mondiales, mai 2017.

Dégradation des terres

PIERI (1989) recense trois causes principales de la dégradation des terres : (1) l'érosion hydrique (pertes en terre) associée à l'augmentation du ruissellement et à la dégradation des propriétés physiques des sols ; (2) la baisse du stock de carbone du sol affectant aussi les propriétés chimiques des sols et (3) des bilans minéraux déséquilibrés associés à une efficacité des engrais qui diminue.

Pertes en terre et dégradation physique

Bilan établi par PIERI (1989)

Les données exposées permettent de faire état de ruissellements et de pertes en terre plus importants pour les sols nus que pour les sols sous jachères ou cultures ; les valeurs les plus faibles étant observées sous les forêts. Des pertes en terre de l'ordre de 35 à 40 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ sur des sols nus et de 8 à 16 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ sous des cultures sont citées. Une perte de 16 Mg.ha⁻¹ équivaut à la disparition d'un millimètre de sol en surface. La porosité et la stabilité des sols sont elles aussi affectées par l'usage des terres.

Situation 25 ans après

D'autres travaux depuis ont confirmé l'importance de l'érosion hydrique en Afrique subsaharienne mais aussi ses grandes variations spatiales et temporelles. Ces travaux s'appuient souvent sur l'équation de Wischmeier (WISCHMEIER et SMITH, 1960) encore appelée équation universelle de pertes en terres (USLE, *Univereal Soil Loss Equation*), ou sa version révisée (RUSLE : *Revised USLE*), qui calcule les pertes annuelles en terre en fonction de la configuration des pluies, du type de sol, de la topographie et du système cultural. TAMENE et LE (2015) par exemple indiquent des pertes en terre dans les bassins de la Volta Blanche et du Haut Nil respectivement de 0 à 120 et de 0 à 650 Mg.ha⁻¹.an⁻¹. KARAMAGE *et al.* (2016) font état pour le bassin du fleuve Nyabarongo au Kenya de pertes en terre annuelles allant de moins de 100 Mg.ha⁻¹ jusqu'à plus de 2 000 Mg.ha⁻¹ selon les conditions locales ; les pertes les plus importantes sont observées sur les terres cultivées.

Selon ELD INITIATIVE et UNEP (2015), l'érosion hydrique serait responsable de la dégradation de 227 millions d'hectares en Afrique et causerait une perte de production de 280 millions de tonnes de céréales par an.

Au niveau des terroirs, les réalisations d'aménagement antiérosif à l'échelle d'un bassin versant ou d'un terroir n'ont concerné qu'une faible étendue de terres en Afrique subsaharienne, et sont généralement liées à des projets spécifiques. Parmi les réalisations les plus importantes, les cordons pierreux au Nord du Burkina Faso ont concerné un peu moins de 400 000 ha (BILGO *et al.*, 2014) avec des résultats significatifs sur les rendements. Les aménagements paysagers en courbes de niveaux avec des bandes enherbées ou avec des cordons

pierreux ou en ados au Nord-Cameroun ont été réalisés sur environ 230 000 ha (OLIVIER *et al.*, 2009) grâce aux trois projets successifs, Développement paysannal et gestion de terroirs, Eaux sols arbres, puis Projet de conservation des sols. Ces aménagements étant réalisés par des services de développement, il n'y a malheureusement pas de données à notre connaissance sur les pertes en terre évitées. Les coûts importants de ces aménagements, leur caractère collectif soulevant des verrous fonciers et les matériels nécessaires à leur exécution (*i.e.* charrettes) expliquent le faible niveau de réalisations.

Au niveau de la parcelle, la technique traditionnelle du *Zai* (LAHMAR *et al.*, 2012) s'est développée sur des sols dégradés au Niger, Mali et Burkina Faso (REIJ *et al.*, 2005 ; BAIDU-FORSON, 1999). Cette technique permet de concentrer l'eau et les fertilisants dans des micro-bassins où sont semés sorghos ou mils. Elle demande un important investissement en travail. L'agriculture de conservation, avec ses trois piliers – la présence de mulch, le non-travail du sol et la pratique des rotations culturales – est aussi une technique permettant de limiter l'érosion hydrique. Elle a fait l'objet de nombreuses promotions en Afrique mais avec une extension très limitée et principalement cantonnée en Afrique orientale et australe (KASSAM *et al.*, 2015).

Baisse du stock de carbone des sols

Bilan établi par PIERI (1989)

PIERI (1989) fait état d'études montrant une diminution drastique du carbone organique du sol (COS) après mise en culture. Parallèlement, d'autres caractéristiques chimiques et physiques du sol se dégradent (teneur en azote, capacité d'échange cationique, somme des cations, structuration de l'horizon de surface, porosité). La baisse de la productivité des systèmes n'est pas immédiate mais peut se produire après 5 à 6 ans de mise en culture.

Au niveau des pratiques de gestion, PIERI (1989) relève que les jachères de courte durée sont peu efficaces pour améliorer le statut organique des sols mais en revanche que des apports organiques permettent de ralentir la perte du stock organique des sols. L'utilisation d'engrais minéraux permettant de produire plus de biomasse, notamment racinaire, conduit à augmenter les entrées de carbone dans le sol.

Les tentatives dans l'ouvrage de PIERI pour modéliser les évolutions des stocks de COS ont le mérite d'avoir mis en avant la nécessité de la modélisation pour mettre au point des gestions appropriées des stocks de COS.

Situation 25 ans après

Les recherches en matière de modélisation des stocks de COS menées depuis les années 1990 ont abouti à la mise au point de modèles de simulation dont les plus utilisés ont été AMG (ANDRIULO *et al.*, 1999), RothC (JENKINSON et RAYNER, 1977) et Century (PARTON *et al.*, 1987). Ces modèles ne diffèrent fondamentalement les uns des autres que par le nombre de compartiments de matière organique des sols qu'ils mettent en jeu. Mis au point pour un milieu

tempéré, leurs paramétrages pour un milieu tropical, tels que décrits dans les travaux de KINTCHÉ *et al.* (2010), ont été jusqu'à présent peu nombreux, ce qui rend leur utilisation difficile en Afrique.

Ces travaux ont abouti à deux constats. Le premier est l'existence d'un compartiment récalcitrant de COS, qui peut représenter une partie non négligeable du COS, même en milieu tropical. L'origine de ce compartiment serait, selon certaines hypothèses, le résultat des feux de végétation et constitué de matières organiques proches du charbon (« *black carbon* »).

Le second constat est l'existence de COS protégé physiquement dans les macro-agrégats du sol que la mise en culture du sol désagrège, ce qui rend ce COS minéralisable (BALESDENT *et al.*, 2000).

De ces constats, il est possible de schématiser l'évolution des différentes formes de COS après défriche et mise en culture (fig. 1) en respectant à la fois les propriétés de ces différents compartiments et les évolutions du carbone total observé. L'existence d'un COS « non protégé » explique sa rapide minéralisation après défriche constatée entre autres par PIERI (1989) et ce quels que soient les systèmes de restitution des biomasses qui sont pratiqués. Cette minéralisation, en libérant des éléments minéraux dans le sol, lui confère une certaine fertilité, indépendamment des restitutions effectuées post-défriche. Ceci explique, comme le montrait PIERI (1989), que la dégradation des caractéristiques des sols ne s'accompagne pas immédiatement d'une baisse des rendements. En revanche, après minéralisation du COS « non protégé », le stock de COS est alors constitué uniquement de carbone récalcitrant et de COS issu de la gestion de la biomasse récente. Pour ces sols, qui deviennent majoritaires en Afrique suite à la raréfaction des jachères longues, des apports réguliers de matière organique et une bonne gestion des biomasses aériennes pour maximiser les retours de carbone dans le sol deviennent alors prépondérants.

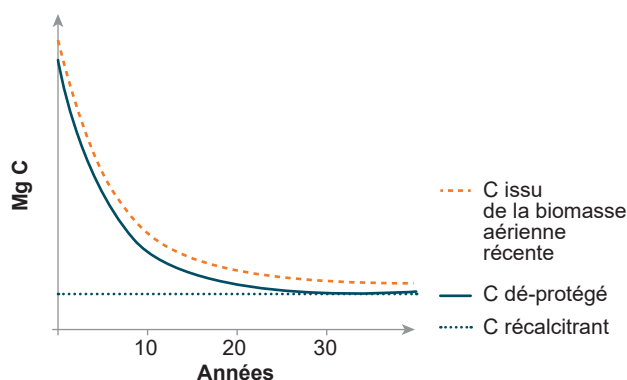


Figure 1

Schéma conceptuel de l'évolution des stocks de carbone organique et de ses différents compartiments dans un sol en culture continue depuis sa défriche (profondeur 0-20 cm).

Dans certains pays comme le Mali, les apports d'amendements organiques se sont généralisés, même s'il s'agit d'amendements peu évolués ou de qualité médiocre (parcage, terre de parc ou ordures ménagères). Dans une large enquête réalisée au Kenya en 2012-2013, WAINAINA *et al.* (2018) indiquent que 65 % des producteurs déclarent utiliser de la fumure animale sur leurs parcelles. Au Niger, TANKARI (2015) fait état de résultats d'une enquête réalisée en 2011 sur plus de 4 500 parcelles chez 1 658 producteurs et qui indique que 32 % des parcelles ont reçu de la fumure animale. FENSKE (2011) fait une revue de la littérature portant sur les pratiques en matière d'investissements agricoles et d'apports au sol en Afrique de l'Ouest. Celle-ci indique (1) que 14 % des parcelles de la région du Brong-Ahafo au Ghana reçoivent de la fumure organique, (2) que les doses utilisées dans la région de Kano au Nigéria dépassent les 4 t.ha⁻¹, mais (3) que seulement 7 % des producteurs utilisent des amendements organiques au Rwanda. Les enquêtes sur ces pratiques sont trop peu nombreuses mais il semble que l'intérêt des amendements organiques soit connu des producteurs et que cette pratique progresse.

Les autres modalités d'apports organiques comme l'agroforesterie sont moins développées (PLACE *et al.*, 2003) et la faible extension de la culture de conservation en Afrique subsaharienne a été mentionnée plus haut. La mise en place de ces pratiques peut être limitée en raison des contraintes foncières, de la vaine pâture, des faibles moyens des exploitations en cheptel ou en outils nécessaires à leur réalisation. Par contre, des projets de replantation d'arbres ou de régénération de parcs à *Faidherbia albida* ont connu un certain succès au Niger avec 5 millions d'hectares concernés (MATHIEU *et al.*, 2014) ou encore au Nord-Cameroun ou au Togo. Des projets de régénération naturelle assistée à grande échelle ont vu le jour au Sahel (projet « Grande Muraille verte » de l'Union africaine, divers projets d'ONG ou d'instituts internationaux). La plantation, ou la conservation d'arbres, par les producteurs sur leurs parcelles est une pratique assez courante avec des objectifs non limités au maintien de la fertilité mais aussi de sécurisation du foncier (FENSKE, 2011). En fait, la principale contrainte à l'extension de cette pratique reste les législations forestières qui n'assurent pas à celui qui plante les bénéfices de son travail.

Bilans minéraux

Bilan établi par PIERI (1989)

PIERI (1989) quantifie les principaux flux intervenant dans le bilan minéral du sol. Les bilans minéraux culturaux (*i.e.* bilan entre éléments minéraux importés et exportés du fait de la mise en culture) et les bilans minéraux globaux (*i.e.* bilan cultural auquel sont ajoutés les pertes et apports par les phénomènes naturels tels les apports par les eaux de pluie, les pertes par lixiviation, par dénitrification, etc.) des sols sont déficitaires pour les principaux systèmes de culture africains décrits. Ils se traduisent généralement par des baisses des teneurs en azote (N), calcium (Ca), magnésium (Mg) dans les sols. Les bilans en phosphore (P) sont

plus équilibrés. Les évolutions des teneurs en potassium (K) reflètent peu les bilans calculés, sans doute du fait de la faible représentativité des méthodes d'évaluation du K échangeable.

PIERI (1989) fait également état de baisses de l'efficacité technique des engrais (gain de rendement en kilos récoltés par kilo d'engrais épandu) avec des valeurs passant de 10 à 2 ou 3 sur des dispositifs de longue durée.

Situation 25 ans après

D'autres études ont confirmé les déséquilibres des bilans cultureux. STOOORVOGEL et SMALING (1990), cité par PARTEY et THEVATHASAN (2013) font état de pertes de 660 kg d'azote (N), 75 kg de phosphore (P) et 450 kg de potassium (K) par hectare durant les années 1960 à 1990 sur environ 200 millions d'hectares cultivés dans 37 pays d'Afrique. Les pertes annuelles moyennes d'éléments minéraux sont estimées par la FAO à 24 kg en 1990 et à 48 kg en 2000, par hectare cultivé (GREENLAND et NABHAN, 2001).

Les consommations d'engrais en Afrique restent très faibles, bien inférieures à celles des autres régions du globe (fig. 2) et sont principalement destinées aux cultures commercialisées telles que le cotonnier, le maïs ou les cultures pérennes.

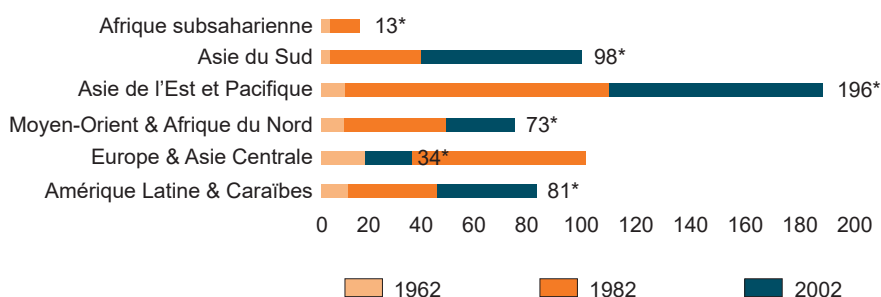


Figure 2

Évolution de la consommation d'engrais (en kilo d'éléments et fertilisants totaux par hectare de terres arables et de culture permanentes) selon des grandes régions mondiales.

* Les valeurs correspondent à la consommation d'engrais en 2002.

En bout de barre lorsque la consommation a augmenté entre 1982 et 2002 ;
en milieu de barre lorsqu'elle a diminué.

Source : THE WORLD BANK, 2007.

BARRET *et al.* (2002) indiquent que l'utilisation d'engrais en Afrique subsaharienne a baissé de 9 % entre 1992 et 1998 et reste au même niveau depuis les années 1980. HOLDEN (2018) confirme que la faible efficacité économique (efficacité technique x rapport des prix production/engrais) de l'utilisation des engrais en Afrique subsaharienne et le risque économique élevé de cet investissement expliquent leurs recours à des doses moyennes très faibles. L'efficacité des engrais est affectée quand les teneurs en COS sont faibles. Des essais sur le

cotonnier ont montré que l'efficacité technique des engrais peut être divisée par deux quand la teneur en carbone des sols passe de 6,5 à 5,5 g C.kg⁻¹ sol (CRÉTENET, 2015).

Au Cameroun, le rapport entre prix d'achat d'un kilo d'engrais et prix de vente d'un kilo de coton-graine a été relativement constant entre 1985 et 2012, autour de 1,25 (CRÉTENET, 2015) mais il a augmenté jusqu'à 1,6 en 2014. Même pour la culture du cotonnier et du maïs, les doses d'engrais réellement épandues par les producteurs sont très souvent en deçà des recommandations faites par la recherche (GUIBERT *et al.*, 2016). Les efficacités techniques et économiques des engrais baissent ces dernières années en raison de la diminution des teneurs en COS et de l'augmentation du coût des engrais notamment quand ils ne sont pas subventionnés. Cette efficacité est d'autre part fortement liée à la bonne réalisation des autres opérations culturales, *i.e.* la densité de culture ou la maîtrise des mauvaises herbes et des ravageurs, qui ne sont pas toujours optimales en Afrique (CRÉTENET, 2015).

Les recherches ont également permis la construction de modèles de croissance de cultures dont les principaux sont STICS (WALLACH *et al.*, 2011), DSSAT (JONES *et al.*, 1998) ou QUEFT (JANSSEN *et al.*, 1990). Ces modèles intègrent l'alimentation minérale, mais sont encore limités à l'azote pour les deux premiers.

Conclusions

Depuis la parution du livre de PIERI, des avancées ont été faites tant sur le plan de la compréhension des mécanismes en jeu dans le fonctionnement des sols tropicaux et l'expression de leur fertilité que sur la mise au point de techniques susceptibles de l'améliorer. Malgré cela, les changements en matière de pratiques agricoles restent modestes et les rendements de la plupart des cultures demeurent à des niveaux médiocres, en dessous ou aux environs de la tonne par hectare. Quelques cultures, principalement celles dont les produits sont commercialisés comme le cotonnier, le maïs ou les cultures pérennes, ont cependant connu une certaine intensification de leurs pratiques et une amélioration de leur rendement, mais elles connaissent actuellement une nouvelle stagnation.

Ce décalage entre résultats de la recherche et réalisations effectives interpelle tous les acteurs du développement pour trouver les modes de diffusion idoines et rechercher les appuis nécessaires aux changements que l'agriculture familiale africaine doit mettre en œuvre pour atteindre les nombreux défis qu'elle doit relever.

Bibliographie

ANDRIULO A., GUÉRIF J., MARY B. 1999

Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural ^{13}C abundance. *Agronomie*, 19 (5) : 349-364. DOI : 10.1051/agro:19990503

BAIDU-FORSON J., 1999

Factors influencing adoption of land-enhancing technology in the Sahel: lessons from a case study in Niger. *Agricultural Economics*, 20 (3) : 231-239. DOI : 10.1016/S0169-5150(99)00009-2

BALESDENT J., CHENU C.,

BALABANE M., 2000

Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53 (3) : 215-230. DOI : 10.1016/S0167-1987(99)00107-5

BARRETT C.B., PLACE F.,

ABOUD A. A., 2002

Natural resources management in African agriculture: understanding and improving current practices. Wallingford, UK, CABI Publishing, 335 p.

BILGO A., SANGARE S. A. K.,

BAMBARA D., HIEN V., 2014

Lutte contre la désertification au Burkina Faso : opportunités et contraintes. *Grain de Sel*, 63-66 (Agro-écologie en Afrique de l'Ouest et du Centre : réalités et perspectives) : 11-13.

CRÉTENET M., 2015

« Potentialités du milieu, rendement et qualité en culture cotonnière ». In Crétenet M., Gourlot J.-P. (éd.) : *Le cotonnier*, Versailles, Wageningen, Gembloux, QUAE, CTA, Presses Agronomiques de Gembloux : 15-24.

ELD INITIATIVE, UNEP, 2015

The economics of land degradation in Africa: benefits of action outweigh the cost. Téléchargeable : www.eld-initiative.org/fileadmin/pdf/ELD-unep-report_07_spec_72dpi.pdf

FENSKE J., 2011

Land tenure and investment incentives: evidence from West Africa. *Journal of Development Economics*, 95 (2) : 137-156. DOI: 10.1016/j.jdeveco.2010.05.001

GREENLAND D. J., NABHAN H., 2001

Soil fertility management in support of food security in sub-Saharan Africa. Rome, FAO, 55 p.

GUIBERT H., KUETEYIM P. K.,

BASSALA J.-P. O., M'BIANDOUN M., 2016

Intensifier la culture du maïs pour améliorer la sécurité alimentaire : le producteur du Nord Cameroun y a-t-il intérêt ? *Cahiers Agricultures*, 25(6) : 65006. DOI : <https://doi.org/10.1051/cagri/2016048>

HOLDEN S. T., 2018

Fertilizer and sustainable intensification in Sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, 18 : 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.07.001>

JANSSEN B. H., GUIKING F. C. T.,

VAN DER EIJK D., SMALING E. M. A.,

WOLF J., VAN REULER H., 1990

A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46 (4) : 299-318. DOI : 10.1016/0016-7061(90)90021-Z

JENKINSON D. S., RAYNER J. H., 1977

The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123 (5) : 298-305. DOI : 10.1097/00010694-197705000-00005

JONES J. W., TSUJI G. Y.,

HOOGENBOOM G., HUNT L. A.,

THORNTON P. K., WILKENS P. W.,

IMAMURA D. T., BOWEN W. T., SINGH U., 1998

« Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3 ». In Tsuji G. Y., Hoogenboom G., Thornton P. K. (éd.) : *Understanding options for agricultural production*, Dordrecht, Springer Netherlands : 157-177.

KARAMAGE F., ZHANG C.,

KAYIRANGA A., SHAO H.,

FANG X., NDAYISABA F., NAHAYO L.,

MUPENZI C., TIAN G. 2016

USLE-based assessment of soil erosion by water in the Nyabarongo river catchment, Rwanda. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13 (8) : 835 (16 p.). DOI : 10.3390/ijerph13080835

- KASSAM A., FRIEDRICH T., DERPSCH R., KIENZLE J., 2015**
Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports*, vol. 8. Téléchargeable : <https://journals.openedition.org/factsreports/3966>
- KINTCHÉ K., GUIBERT H., SOGBEDJI J. M., LEVÊQUE J., TITTONELL P., 2010**
Carbon losses and primary productivity decline in savannah soils under cotton-cereal rotations in semiarid Togo. *Plant and Soil*, 336 (1) : 469-484. DOI : 10.1007/s11104-010-0500-5
- LAHMAR R., BATIONO B. A., DAN LAMSO N., GUÉRO Y., TITTONELL P., 2012**
Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: building on traditional local practices for soil restoration. *Field Crops Research*, 132 : 158-167. DOI : 10.1016/j.fcr.2011.09.013
- LEBEL T., ALI A., 2009**
Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*, 375 (1) : 52-64. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2008.11.030
- MATHIEU B., MAMADOU A., IBRAHIM H., 2014**
L'émergence de l'agro-écologie au Niger. *Grain de Sel*, 63-66 (Agro-écologie en Afrique de l'Ouest et du Centre : réalités et perspectives) : 14-15.
- OGUNKUNLE A., MUSUMBA M., 2014**
« Smallholder agriculture and climate variability and change in sub-Saharan Africa: looking forward to 2050. Current status and importance of smallholder agriculture ». In Ameyo D. S. (éd.) : *Alliance for a Green Revolution in Africa (AGRA). Africa agriculture status report 2014. Climate change and smallholder agriculture in sub-Saharan Africa*. Nairobi, Kenya, Smart Printers Edition : 20-21.
- OLIVIER D., TOUMBA DOURWE G., ABOU ABBA A., 2009**
Présentation du projet de conservation des sols au Nord-Cameroun (PCS-ESA II). Garoua, Cameroun, SODECOTON.
- PARTEY S. T. THEVATHASAN N. V., 2013**
Agronomic potentials of rarely used agroforestry species for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: an exploratory study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44 (11) : 1733-1748. DOI : 10.1080/00103624.2013.769563
- PARTON W. J., SCHIMEL D. S., COLE C. V., OJIMA D. S., 1987**
Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands 1. *Soil Science Society of America Journal*, 51 (5) : 1173-1179. DOI : 10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x
- PIERI C., 1989**
Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, CIRAD-IRAT, La Documentation française, 444 p.
- PLACE F., BARRETT C. B., FREEMAN H. A., RAMISCH J. J., VANLAUWE B., 2003**
Prospects for integrated soil fertility management using organic and inorganic inputs: evidence from smallholder African agricultural systems. *Food Policy*, 28 (4) : 365-378. DOI : 10.1016/j.foodpol.2003.08.009
- REIJ C., TAPPAN G., BELEMVIRE A., 2005**
Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1968-2002). *Journal of Arid Environments*, 63 (3) : 642-659. DOI : 10.1016/j.jaridenv.2005.03.010
- STOORVOGEL J. J., SMALING E. M. A., 1990**
Assessment of soil nutrition depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000. Vol. II: nutrients balances per crop and land use system (Report n° 28). Wageningen, the Netherlands, The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, 585 p.
- TAMENE L., LE Q. B., 2015**
Estimating soil erosion in sub-Saharan Africa based on landscape similarity mapping and using the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102 (1) : 17-31. DOI : 10.1007/s10705-015-9674-9
- TANKARI M. R., 2015**
Action levers for a sustainable farmland management in Niger. *International Journal of Food and Agricultural Economics*, 4 (3) : 43-54. Téléchargeable : www.foodandagriculturejournal.com/vol3.no4.pp43.pdf.

THE WORLD BANK, 2007

World development report 2008: agriculture for development. Washington D.C., World Bank, 394 p.

WAINAINA P., TONGRUKSAWATTANA S.,

QAIM M., 2018

Synergies between different types of agricultural technologies in the Kenyan small farm sector.

The Journal of Development Studies, 54 (11) : 1974-1990. DOI : 10.1080/00220388.2017.1342818

WALLACH D., BUIS S., LECHARPENTIER P.,

BOURGES J., CLASTRE P., LAUNAY M.,

BERGEZ J. E., GUERIF M., SOUDAIS J.,

JUSTES E., 2011

A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling & Software*, 26 (4) : 386-394. DOI : 10.1016/j.envsoft.2010.09.004